

## 나노 실리카 분말을 혼입한 콘크리트의 내화성능연구

조병완<sup>1)</sup> · 박종빈<sup>1)</sup> · 박종화<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과

(2004년 5월 20일 원고접수, 2005년 2월 15일 심사완료)

### A Study on Fire-Resistant Performance of Concrete Using Nano-Silica Particles

Byung-Wan Jo<sup>1)</sup>, Jong-Bin Park<sup>1)</sup>, and Jong-Hwa Park<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-709, Korea

(Received May 20, 2004, Accepted February 15, 2005)

#### ABSTRACT

Recently, since the advanced nano technology develops unique physical and chemical properties different from those of the conventional materials. Normal concretes mixed with nano- $SiO_2$  have been studied to improve the fire-resistance with high strength and lower heat conductivity.

In this pilot study, the nano-particle contents in the specimens ( $\Phi$  100×200 mm) were 0, 2, 4, and 6% by weight of cement, and fire-temperatures 200 °C, 500 °C, and 800 °C were considered.

The results show that as the nano-particle contents increases, the weight loss of concrete gradually decreases, and the compressive strength after fire-attack increases effectively.

**Keywords :** nano, silica, fire resistance, concrete

#### 1. 서 론

콘크리트의 내화성이란 화재로부터 보호되고 고열환경에 견디는 재료적 특성, 즉 화재온도 1,000 °C 정도의 고온을 30분에서 3시간 정도를 받은 경우 콘크리트 중에 매립된 철근 등 철강을 소정의 온도 이하로 유지하기 위한 피복역할을 유지하면서 구조물의 큰 변형이나 붕괴 등을 막기 위한 소요 압축강도 및 영계수 등의 성능을 가지고 있는 성질을 말한다. 일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해서 열전도율 또는 열확산계수가 현저히 낮아서 구조체의 내화구조 또는 방화구조 재료로 널리 사용된다. 또한 콘크리트는 고온에서 완전붕괴에 도달하기까지의 에너지 소산 능력이 우수하기 때문에 화재 등과 같은 비상상황에서 건물 사용자가 충분한 대피시간을 확보할 수 있도록 해준다. 그러나 이와같은 장점에도 불구하고 화재시 가열에 의해 콘크리트 구조물에는 구조전체에 걸쳐 열응력과 열변형에 의한 손상뿐 아니라 기동, 보, 바닥판 등에 폭렬(爆裂)현상과 같은 국부적인 파괴가 생기게 된다.

이에 선진각국에서는 화재시 콘크리트의 응력 및 열 변형에 의한 피해를 규명하기 위하여 석회암, 탄산염암 및 팽창골재 등을 사용한 콘크리트를 고온(상온-800 °C)으로 가열하면서 이때의 역학적 성질, 특히 응력과 변형의 관계에 대한 많은 시험과 연구가 수행되어 왔으며 콘크리트의 취약성에 기인하는 변형 등에 대한 원인 규명이 이루어지고 있다. 또한 국내에서는 고온으로 가열하고 난 후 상온에서 냉각된 콘크리트를 대상으로 압축강도, 탄성계수 등의 내열성능에 대한 연구를 시작으로 고온에서의 콘크리트 재료모델과 열거동 해석에 대한 이론적 연구 등이 이루어졌지만 콘크리트의 내화성능을 개선하기 위한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 나노 분말소재 중 나노실리카 분말을 콘크리트에 혼입하면 강도가 증대되고 열전도율이 낮아져 내화성능이 향상될 것이라는 점에 착안하여 나노실리카 분말 혼입률과 실험온도를 변수로 설정하여 실험체( $\Phi$  100×200 mm)를 제작, 중량손실률, 내부온도 측정 및 압축강도실험 등을 수행하였으며, 나노실리카 분말과 보통 콘크리트의 실험결과를 비교·분석하였다.

\*Corresponding author

E-mail : joycon@hanmail.net

©2005 by Korea Concrete Institute

## 2. 실 험

### 2.1 콘크리트 내화성 측정을 위한 실험 기준 및 방법

콘크리트의 내화실험에 있어서 내화성능은 배합비와 양생방법, 화기에의 노출시간 및 속도 등과 같은 수많은 변수에 의해 영향을 받으므로 화재에 의한 피해를 받지 않는 콘크리트를 만들기 위해서는 콘크리트의 구성성분, 성분의 거동과 콘크리트의 성능에 대한 영향을 이해하는 것이 필요하다. 콘크리트의 내화성을 연구하는데 있어서 실험기준은 국제표준으로 인정되고 있는 RILEM Committee 129-MHT(Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures)과 ASTM E119 REV, ISO 834, JIS A 1304 등이 있으며 시험의 종류와 연구내용은 Tables 1, 2와 같다.

고온에서 콘크리트의 내화성능을 평가하기 위한 실험방법은 크게 재료특성 평가 실험과 부재특성 평가 시험으로 나누어 질 수 있으며, 재료특성 평가 실험은 다시 물리적 특성 실험과 역학적 특성 실험으로 분류된다.

또한 고온에서 콘크리트의 재료특성 변화는 온도변화에 따라 영향을 받기 때문에 콘크리트 내부온도의 열적 안정 상태 여부에 따라 크게 정적상태(steady state) 온도실험과 일시상태(transient state) 온도실험으로 분류되어 수행되고 있다.

일반적으로 물리적 특성 실험은 외부의 하중 재하 없이 콘크리트 매트릭스의 온도에 따른 열적 특성 변화를 평가하기 위하여 콘크리트 내부가 각각의 목표온도(20-1000℃)에서 균일한 온도분포를 보여 열적 안정 상태에 도달되었을 때 이루어지는 정적상태 온도실험으로 수행되고 있다. 그러나 역학적 특성 실험의 경우에는 콘크리트의 적용부위, 수분영향에 따른 변형 등을 평가할 목적으로 정적상태 온도실험과 일시상태 온도실험을 병행하여 수행되고 있지만 압축강도, 응력-변형도 곡선, 크리프 변형 등 실험을 통해 얻고자 하는 특정 데이터의 종류 및 실험체 가열조건, 하중조건 등에 따라 차이를 보이고 있다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 규격을 만족하는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 화학조성 및 물리적 특성은 Tables 3, 4와 같다

#### 2.2.2 골재

잔골재는 표준사를 사용하였으며, 굵은골재의 최대 크기는 대개 13mm 이상이 추천되고 있으나, 일반적으로 최대 조골재 크기는 25mm로 합니다. 본 연구에서는 공극의 크

기를 최소화하기 위하여 최대 조골재 크기를 13mm로 하여 굵은골재로 인한 공극의 크기가 커지는 것을 방지하기 위해 이와같이 정하였습니다. KS F 2502-2511 및 KS F 2531-2534의 시험방법에 따른 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 특성은 Table 5와 같다.

#### 2.2.3 나노분말소재

콘크리트의 내화성능개선을 위해 사용된 나노 분말소재는 국내 D사의 나노실리카 분말로 순도 99.8%이며, 그 특성은 Table 6과 같다. 본 실험에서는 시멘트 중량비의 2, 4, 6%를 치환하여 사용하였다.

**Table 1** Type of fire-resistance test

Type	Content
Steady state test	Test method is applicable to the measurement of thermal transmission through a wide range of specimen properties and environmental condition.
Transient test	A means of assessing reservoir performance by measuring flow rates and pressures under a range of flowing conditions and applying the data to a mathematical model

**Table 2** The relation of temperature & load

Type	content
Unstressed test	The specimens were heated without restraint
Stressed test	Specimens were restrained by a preload equal to 40 percent of their room-temperature compressive strength
Residual property test	Design to provide property data of concrete data at room temperature after exposure to elevated temperatures

**Table 3** Physical property of cement

Type	Gravity	Fineness ( $cm^2/g$ )	Setting time (hr)		Compressive strength (MPa)		
			Initial	Final	3day	7day	28day
OPC	3.15	3,341	3.52	6.27	22.0	29.5	38.2

**Table 4** Chemical property of cement

Component	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Loss on ignition	Free CaO
Content (%)	61.3	21.1	5.2	4.0	2.8	2.4	2.0	0.6

**Table 5** Physical property of aggregate

Type	Gravity	Absorption(%)	Erection
Sand	2.60	0.94	2.90
Coarsel	2.69	1.02	6.20

**Table 6** Physical property of nano particles

Type	Purity (%)	Size (nm)	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	Loss on ignition (wt.%)	PH
Nano silica	99.8	100	20	3	7

**Table 7** Mixing table

No.	W/C (%)	S/a (%)	Mixing(kg/m <sup>3</sup> )					Temp. (°C)		
			W	C	G	S	Nano			
N0-H0	50	42	180	360	1101	771	0%	0	20	
N0-H2									200	
N0-H5							500			
N0-H8							800			
N2-H0							352.8	2%	7.2	20
N2-H2										200
N2-H5								500		
N2-H8								800		
N4-H0				345.6	4%	14.4		20		
N4-H2								200		
N4-H5								500		
N4-H8								800		
N6-H0				338.4	6%	21.6	20			
N6-H2							200			
N6-H5							500			
N6-H8							800			

N0 Nano silica 0%      H0 Concrete inside temp. 20 °C  
 N2 Nano silica 2%      H2 Concrete inside temp. 200 °C  
 N4 Nano silica 4%      H5 Concrete inside temp. 500 °C  
 N6 Nano silica 6%      H8 Concrete inside temp. 800 °C

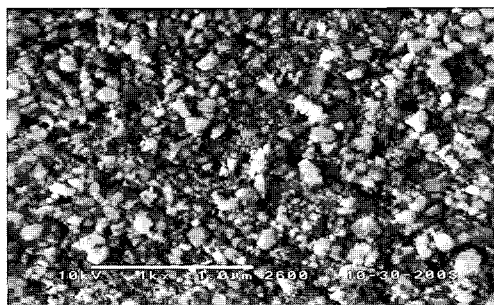
**2.3 콘크리트 배합 및 시험체**

**2.3.1 배합**

본 연구에서 콘크리트 배합은 물-시멘트비를 0.50, 잔골재율을 0.42, 단위수량을 고정하고, 시멘트 중량대비 나노 실리카 분말량을 0, 2, 4, 6% 혼입시켜 동일조건에서 내열 성능비교를 하도록 배합계획을 수립하였다. 이에 따른 배합표는 Table 7과 같다.

**2.3.2 시험체 제작 및 양생**

Fig 2는 본 연구에 사용된 시험체를 나타낸 것이다. 콘크리트의 고온에서의 중량손실률, 압축강도 시험체는 KS



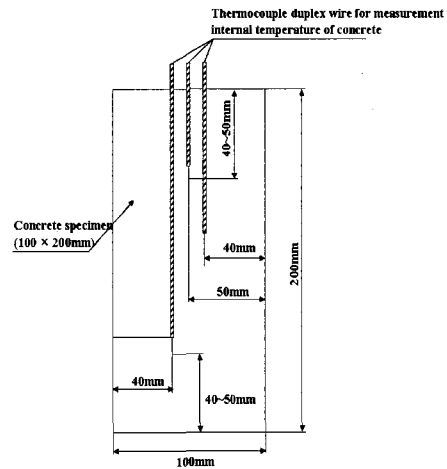
**Fig. 1** Nano-silica

F403(콘크리트의 강도시험용 공시체)에 따라 Φ10×20 mm의 시험체를 제작하였으며, 상대적 열전도율을 측정하기 위한 내부온도측정용 시험체는 콘크리트가 초결이 시작되기 전에 K타입 열전대선을 Fig. 2와 같이 일정한 위치에 삽입한 후 24시간 후 탈형하여 20 ± 3 °C에서 28일간 공기 중 양생하여 제작하였다.

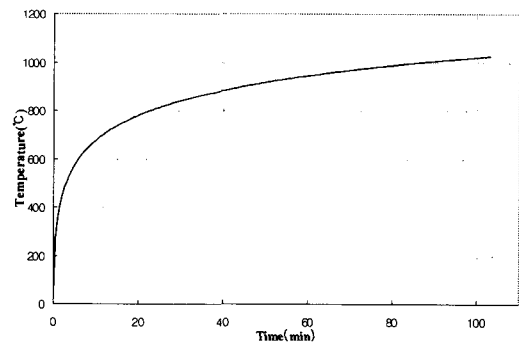
**2.4 실험 방법**

**2.4.1 가열조건**

Fig 3은 본 연구에 사용된 가열로(furnace)의 가열조건을 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 가열로의 가열조건은 현재 국제표준으로 인정되고 있는 RILEM Committee 129-MHT(Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures)과 ASTM E119 REV, ISO 834, JIS A 1304에서 규정하고 있는 표준가열온도곡선 조건에 따라 수행하였으며, 본 연구는 내화시험의 종류 중 정적상태시험(Steady-state test)을 통한 정상상태 시험(Residual property test)을 실시하였다. 콘크리트 내부온도가 20~800 °C까지 가열된 시험체를 대상으로 수행하였다.



**Fig. 2** Specimen to measure inner temperature



**Fig. 3** Fire simulated temperature curve

### 2.4.2 실험방법

#### 1) 고온에서의 물리적 특성 실험

콘크리트의 물리적 특성실험은 상대적인 열전도율과 내화 Mechanism을 파악하기 위해 Fig 2와 같이 열전대선을 이용하여 콘크리트의 내부온도를 측정하였다. 중량손실율은 Fig 4의 가열로에서 가열하여 콘크리트 내부온도가 목표온도에 도달되면 목표온도에서 5~10분동안 콘크리트 내부온도를 정상상태로 이르게 한 후 다시 서서히 냉각하여 상온에서 중량손실률을 측정하였다.

#### 2) 콘크리트의 압축강도 잔존율 실험

본 연구에서는 정상상태시험(residual property test)를 통해 고온에서 콘크리트의 압축강도, 압축강도 잔존율 실험을 실시하였다. 압축강도 잔존율 실험은 화재피해를 입은 콘크리트의 성능평가를 위하여 수행하였다. 정상상태 시험의 목적은 화재피해를 입은 콘크리트의 성능평가를 위한 것으로 실험체를 실험목표온도까지 가열한 후 정적상태에 이를 때까지 유지한 후 냉각된 실험체는 상온에서 하중제어 실험 및 변형제어 실험이 적용된다. 이에 본 연구에서는 실험체를 목표온도까지 일정한 비율로 사전재하 없이 가열하였고 목표온도에서 정적상태에 도달될 수 있도록 10분 동안 유지시켰다. 이 후에 실험체는 상온까지 서서히 냉각시켰으며, 냉각된 실험체는 KS F 2405의 재하속도 규정에 따라 Fig 5의 UTM을 사용하여 공시체가 파괴될 때까지 하중을 가하여 압축강도 및 압축강도 잔존율을 구하였다.

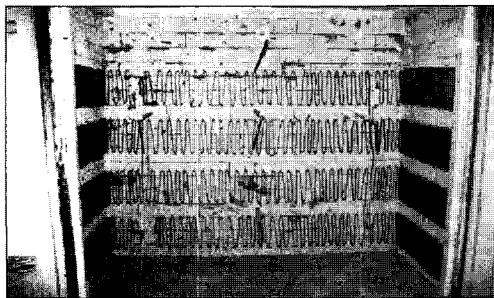


Fig. 4 The furnace for fire-resistant test

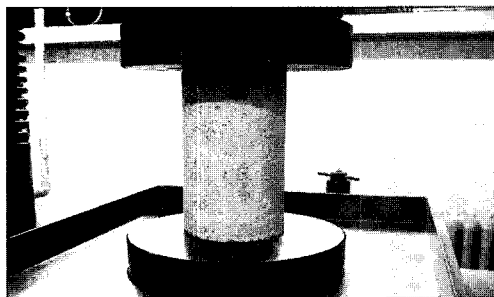


Fig. 5 The measurement of compressive strength

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 물리적 특성 실험

#### 3.1.1 중량손실률

내부에 수분을 포함한 공극을 지니고 있는 콘크리트는 열을 받게 되면 공극내의 수분은 팽창하여 콘크리트 내부 응력을 급격하게 상승시키거나 증발되며, 증발되지 않는 수분은 내부 공극으로부터 이탈되는 등 역학적 관점에서 치수불안정을 발생시키게 된다. 따라서 가열된 콘크리트 내부의 수분 이동과 흐름에 따른 중량손실률은 고온 가열된 콘크리트의 치수변화를 고려하고 있지 않는 단위용적 중량과는 달리 고온에서의 콘크리트 내열성능변화에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 고온가열시 보통 콘크리트와 나노실리카 분말을 혼합한 콘크리트의 내부온도와 중량손실률과의 관계는 Table 8 및 Fig. 6와 같다.

Fig 6에서 6%혼입 콘크리트가 가장 적은 중량손실을 나타내고 있으며, 이는 목표온도 200 °C에서는 보통콘크리트와 약 1%정도의 차이를 보이고 있고, 또한 목표온도 800 °C에서는 상온과 비교하여 약 6%정도의 중량손실률을 보이고 있어 보통 콘크리트보다 약 1%정도 적은 중량손실률을 보이고 있다. 이상과 같이 보통 콘크리트 및 나노실리카 분말을 혼합한 콘크리트는 상온에서 200 °C까지는 높은 중량손실률을 보이고 있으나, 200 °C이후부터는 중량손실률이 완만하게 증가하고 있다.

이는 콘크리트는 200 °C전에 내부의 수분이 증발되어 대부분의 중량손실을 보인다. 하지만 나노실리카 분말을 혼합

Table 8 The ratio of weight loss (Unit : %)

No.	200 °C	500 °C	800 °C
N0	4.31	5.83	6.72
N2	3.82	5.35	6.51
N4	3.65	4.78	6.22
N6	3.28	4.00	6.05

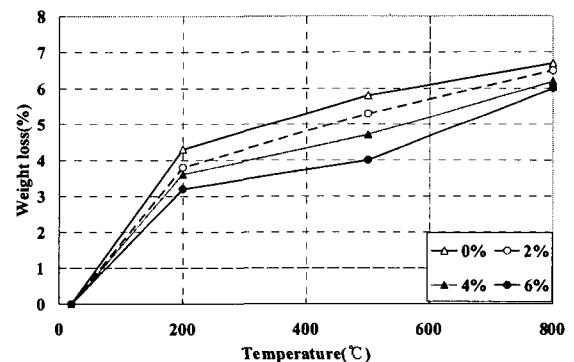


Fig. 6 The ratio of mass loss of concrete

한 콘크리트는 수분의 증발이 보통콘크리트보다 높은 온도에서 발생되어 보통콘크리트에 비해 중량손실이 적은 것으로 판단된다.

### 3.1.2 콘크리트 내부온도

보통 콘크리트와 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트의 고온가열에 따른 내부온도 상승을 측정한 결과는 Figs. 7~9와 같다.

Fig 7에서와 같이 목표온도 200 °C로 가열된 보통 콘크리트는 내부온도 100 °C, 가열시간 10~30분에서 급격한 온도상승을 나타내고 있으며, 30~40분 이후부터는 내부온도가 완만한 온도상승이 나타났으며, Fig 8의 목표온도 500 °C로 가열된 콘크리트는 40~120 °C, 10분에서 20분까지는 급격한 온도상승을 나타냈으며, 120 °C정도에서 내부온도의 상승이 약 20분간 둔화하였다가 다시 상승하는 것으로 나타났다. 또한 Fig 9의 목표온도 800 °C로 가열된 콘크리트 역시 120 °C부근에서 내부온도가 일정하게 유지되었다가 다시 상승하는 것으로 나타났다.

이상과 같이 보통 콘크리트와 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트는 고온 가열될 경우 내부온도 120 °C부근에서 수증기가 발생하면서 내부온도 상승이 일시적으로 멈추었다가 다시 상승하는 것으로 나타나고 있다. 또한 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트는 혼입량이 많을수록 120 °C부근에서 온도가 둔화되는 시간이 지연되는 것으로 보인다.

Fig 9에서 보는바와 같이 500 °C에 도달하는 시간은 보통콘크리트는 약 50분으로 나타나고, 나노실리카 분말을 6%혼입한 콘크리트는 70분으로 보통 콘크리트의 도달시간이 약 20분정도 지연되고, 또한 700 °C에 도달하는 시간은 약 40분정도 지연되고 있음을 알 수 있다.

콘크리트의 내부온도 상승이 일시적으로 둔화되는 것은 콘크리트가 가열되면서 콘크리트 내부에 존재하는 잉여수, 모세관수, 흡착수, 층간수 및 화학적 결합수의 손실로 인해 발생하는 것으로 판단되며, 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트의 목표온도에 도달하는 시간이 지연되는 것은 나노실리카 분말에 의해 보통 콘크리트보다 수화생성물의 증가와 마이크로 크기의 시멘트 입자 사이에 나노 크기의 실리카가 충전 역할을 하면서 보다 조직이 치밀해지기 때문으로 판단되어졌다.

## 3.2 역학적 특성

### 3.2.1 압축강도 및 잔존율

고온가열시 보통 콘크리트와 나노실리카분말 혼입 콘크리트의 내부온도와 압축강도 및 잔존율과의 관계는 Table 9와 같다.

상온에서 나노실리카 혼입률에 따른 재령별 압축강도와 의 관계는 다음 Fig 10과 같다. 상온에서의 재령과 압축강

도와의 관계를 회귀분석한 결과 도출된 제안식은 다음 Table 10과 같다. 제안식과 측정값과의 상관계수는 약 0.90이상으로 신뢰도가 매우 높게 나타났다.

Fig 10에 보는바와 같이 재령 28일의 나노실리카 분말 0%혼입한 콘크리트의 상온에서의 평균압축강도는 23.1 MPa, 2%혼입한 콘크리트는 28.8MPa, 4%혼입한 콘크리트는 29.3MPa, 6%혼입한 콘크리트는 30.6MPa가 나왔다.

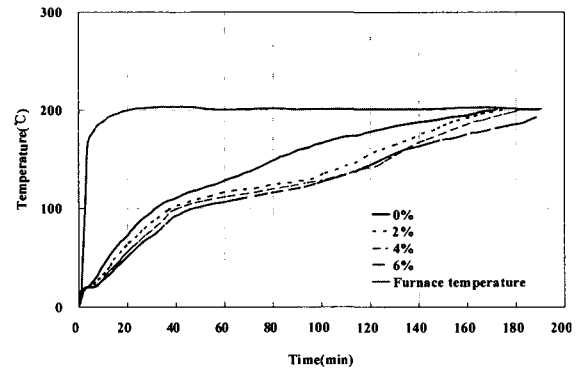


Fig. 7 The inner temperature of concrete by heating to 200 °C

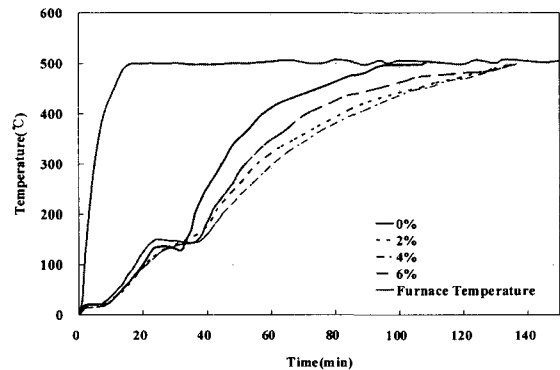


Fig. 8 The inner temperature of concrete by heating to 500 °C

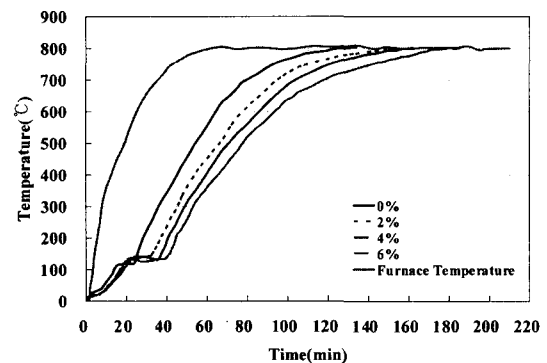


Fig. 9 The inner temperature of concrete by heating to 800 °C

**Table 9** Compressive strength and rate of salvage by inner temperature

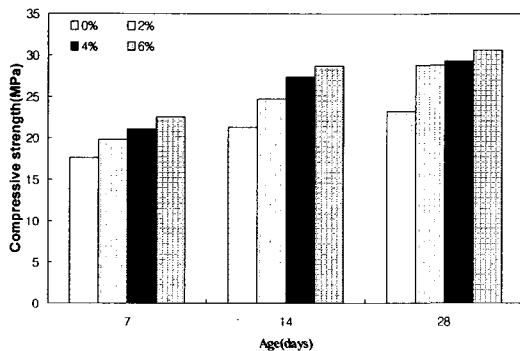
Age (days)	No.	20℃		200℃		500℃		800℃	
		Compressive strength (MPa)	Salvage (%)	Compressive strength (MPa)	Salvage (%)	Compressive strength (MPa)	Salvage (%)	Compressive strength (MPa)	Salvage (%)
7	N0	17.6	100	13.0	73.8	9.4	53.4	2.1	11.8
	N2	19.8	100	14.8	74.6	11.0	55.3	2.7	13.6
	N4	21.1	100	15.9	75.5	11.5	54.6	2.9	13.9
	N6	22.5	100	17.7	78.3	12.6	56.1	3.3	14.5
14	N0	21.3	100	17.8	83.8	12.1	56.7	2.6	12.4
	N2	24.7	100	20.9	84.9	13.9	56.4	3.6	14.5
	N4	27.4	100	23.3	85.2	16.0	58.4	3.9	14.4
	N6	28.7	100	24.3	84.8	16.9	58.9	4.5	15.6
28	N0	23.1	100	19.8	85.7	12.8	55.4	3.2	14.8
	N2	28.8	100	24.8	86.2	16.5	57.2	4.8	16.6
	N4	29.3	100	25.2	86.1	17.0	57.9	5.1	17.4
	N6	30.6	100	26.6	87.1	17.9	58.6	5.4	17.8

**Table 10** The relationship between Age & Compressive strength at 20℃

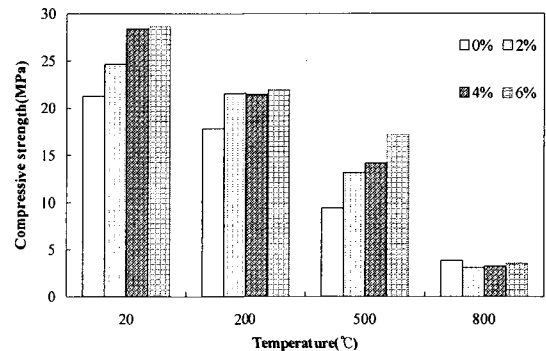
Mixing amount	Age and compressive strength (Rregression analysis)	Rregression factor (R <sup>2</sup> )
0%	$f_c = 12.154x^{0.1933}$	0.9538
2%	$f_c = 11.834x^{0.2703}$	0.9893
4%	$f_c = 13.747x^{0.2368}$	0.8955
6%	$f_c = 15.056x^{0.2218}$	0.8982

**Table 11** The relationship of Compressive strength by inner temperature of aged 28 days concrete

Mixing amount	Rregression analysis (T=temperature, ℃)	Relation factor (R <sup>2</sup> )
0%	$f_c = -10^{-5}T^2 - 0.0147T + 23.356$	0.9999
2%	$f_c = -20^{-5}T^2 - 0.0172T + 29.07$	0.9998
4%	$f_c = -20^{-5}T^2 - 0.0177T + 29.528$	0.9997
6%	$f_c = -20^{-5}T^2 - 0.0168T + 30.868$	0.9999



**Fig. 10** Compressive strength along inclusion of nano-silica by age(curing temperature: 20℃)



**Fig. 11** Compressive strength( $f_c$ ) by inner temperature(T) of aged 28 days concrete

6%혼입한 콘크리트의 압축강도는 보통 콘크리트의 압축강도보다 약 30%증가된 성능을 보이며, 재령 7일에서의 나노실리카 분말을 6% 혼입한 콘크리트의 강도는 보통 콘크리트(나노실리카를 혼입하지 않은 콘크리트)의 재령 28일의 강도와 비슷한 수준에 도달하였다. 이는 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트는 시멘트 수화물에 의해 생성된  $Ca(OH)_2$ 와 반응을 하는 포졸란반응을 통해 더 많은 수화물을 생성할뿐더러 공극을 충전시켜주는 충전제 역할도 하기 때문에 나노실리카를 혼입하지 않은 콘크리트보다 압축강도가 높아지는 결과를 가져온다.

다음의 Fig 11 및 Table 11은 콘크리트 내부온도를 변수

로 한 재령 28일의 잔류 압축강도식을 데이터와 비교하여 그래프 및 표로 나타낸 것이다. 위의 Fig 11에서 보는바와 같이 각 재령에 따라 강도와 콘크리트의 내부온도의 관계의 실험결과를 회귀분석하여 얻은 압축강도를  $f_c$ 로 나타내었다. 또한 온도가 증가함에 따라  $f_c$ 값이 감소하여 온도와 압축강도간의 상관관계가 존재함을 알 수 있다. Table 11은 각 재령별 콘크리트의 압축강도와 내부온도간의 상관관계를 나타낸 것으로 압축강도  $f_c$ 를 콘크리트 내부온도 T에 관한 함수로 표현할 수 있었으며 약 0.99이상의 높은 상관계수를 나타내었다. 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트 및 보통콘크리트의 재령 28일 잔류 압축강도를 예측할

수 있는 식을 나타내었으며 콘크리트의 내부온도를 알 수 있다면 고온가열시 잔류압축강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

보통 콘크리트와 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트의 열적 특성 비교 및 내화성능을 파악하기 위해 실험방법에 따른 물리적·역학적 특성 평가를 실시하고 내부온도 측정 및 내화 메커니즘 및 강도감소요인을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령 28일인 나노분말 6%혼입 콘크리트가 가장 적은 중량손실을 나타내고 있으며, 이는 목표온도 200℃에서는 보통 콘크리트와 약 1%정도의 차이를 보이고 있고, 또한 목표온도 800℃에서는 상온과 비교하여 약 6%정도의 중량손실률을 보이고 있어 보통콘크리트보다 약 1%정도 적은 중량손실률을 보이고 있다. 상온에서 200℃까지는 높은 중량손실률을 보이고 있으나, 200℃이후부터는 중량손실률이 완만하게 증가하고 있다. 이는 보통 콘크리트는 200℃전에 내부의 수분이 대부분 증발되어 200℃이후에는 중량손실에 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 또한 대부분의 중량손실은 200℃전후에서 수분의 증발로 발생한다는 것을 알 수 있다.
- 2) 재령 28일의 보통 콘크리트의 상온에서의 평균압축강도는 23.1MPa, 나노실리카 분말을 2%혼입한 콘크리트는 28.8MPa 4%혼입한 콘크리트는 29.3MPa, 6%혼입한 콘크리트는 30.6MPa가 나왔다. 상온 양생의 재령별 강도발현을 측정하여 함수로 분석한 결과 나노실리카 분말을 6%혼입한 콘크리트의 압축강도 회귀분석식은  $f_c = 15.056x^{0.2218}$ 로 도출되었다. 또한, 6% 혼입한 콘크리트의 압축강도는 보통 콘크리트의 압축강도보다 약 30%증가된 성능을 보인다. 이는 나노실리카 분말을 혼입한 콘크리트는 시멘트 수화물에 의해 생성된  $Ca(OH)_2$ 와 반응을 하는 포졸란반응을 통해 더 많은 수화물을 생성할뿐더러 공극을 충전시켜주는 충전제 역할도 하는 것으로 판단된다.
- 3) 재령 28일 콘크리트의 가열온도 200℃에서는 80%이상의 잔존율을 나타내며, 가열온도 500℃에서는 약 50%이상의 잔존율을 측정되었으며 가열온도 800℃에서는 압축강도가 급격히 감소하여 10%~20%를 나타내고 있다. 800℃에서 나노실리카 혼입량이 6%까지는 혼입

량이 증가할수록 압축강도 잔존율이 감소하는 경향을 보이나 이는 상대적으로 목표온도에 도달되는 시간이 나노량이 증가할수록 늘어나 더 오랜 시간 고온을 수열하기 때문으로 판단된다. 그러므로 같은 조건과 시간의 고온을 수열 한다면 나노실리카 혼입량 6%까지는 혼입량이 증가할수록 압축강도의 잔존율은 증가하는 것으로 판단된다.

- 4) 200℃에서 콘크리트는 콘크리트의 강도에 상관없이 콘크리트 내부에 존재하는 잉여수, 모세관수, 흡착수, 층간수 및 화학적 결합수의 일부가 수증기로 방출됨으로서 콘크리트 내부의 공극압력 상승에 따라 중량손실률이 크게 저하하고 있으며, 계속적으로 500℃이상 가열되면 콘크리트 강도에 상관없이 골재와 시멘트페이스트의 결합력이 상실되어 500℃이후의 고온영역에서 콘크리트는 성능저하가 크게 나타났다. 그러나 500℃에 도달하는 시간은 나노혼입 콘크리트는 보통 콘크리트보다 최대 약 35분정도 지연되었고, 또한 700℃에 도달하는 시간은 약 60분정도 지연되어 보통 콘크리트보다 내화성능이 우수함을 알 수 있다.

본 실험에서 구한 고온에서의 물리적·역학적 실험결과 강도 및 내부온도 증가면에서는 보통 콘크리트와 비교하여 충분히 건설용 구조재료로서의 사용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 본 연구를 기초로 하여 나노분말의 종류 및 실험방법별 고온에서의 열적특성 변화에 대한 다각적인 연구가 이루어져야 할 것이며, 아울러 콘크리트의 재료 물성 평가 및 나노분말의 물성 평가와 더불어 화재시 구조부재의 온도분포 및 열거동 해석에 대한 연구를 통하여 콘크리트 구조부재의 적용부위에 따른 화재안전성능 평가가 이루어져야 건설용 구조재료로서 사용이 가능하리라 판단된다.

#### 참고문헌

1. Schneider, U., "Behavior of concrete under thermal steady state and non-steady conditions," *Fire and Materials*, Issue 1, 1976, pp.103~15.
2. 한국콘크리트학회, "(건설교통부제정) 콘크리트 표준시방서", 한국콘크리트학회, 1999, pp.255~258.
3. 방재시험연구원, "내화성능 시험방법에 관한 연구", 방재시험연구원, 1992, pp.14~16.
4. 서치호외 4인, "내화구조의 대상 및 성능기준 연구", 방재시험연구원, 1999.

---

## 요 약

일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해서 우수한 내화성능을 가지고 있기 때문에 내화구조 또는 방화구조 재료로 널리 사용되고 있으나, 화재시 가열에 의해 열응력과 열변형에 의한 손상뿐 아니라 폭렬(爆裂)현상과 같은 국부적인 파괴가 일어나게 된다. 따라서 이를 보완하기 위한 여러 연구가 진행되어지고 있다. 또한 최근, 첨단 나노기술은 일반적인 재료들과 다른 독특한 물리적, 화학적 특성을 갖도록 개발되고 있다. 나노  $SiO_2$ 가 혼입된 콘크리트의 내부온도, 중량손실을 및 압축강도 특성을 비교·검토하여 높은 응력의 내화와 낮은 열적 거동의 증진을 연구하였다.

본 연구에서는 나노입자가 시멘트 중량의 0, 2, 4, 6% 포함된 시편 ( $\Phi 100 \times 200$ mm)과 화력 온도 200 °C, 500 °C, 800 °C에서 실험을 수행하였다. 그 결과 나노 입자 혼입률이 증가할수록 화력을 가한 후의 콘크리트 중량 손실률은 점차 감소하고, 압축 강도는 효과적으로 증가하였다. 따라서 고온에서의 물리적·역학적 실험결과 강도 및 내부온도 증가면에서는 보통 콘크리트와 비교하여 충분히 건설용 구조재료로서의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 나노, 실리카, 내화, 콘크리트

---